Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 2. С. 157–162
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006 2018. Vol. 18, no. 2, pp. 157–162

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 536.248.2.001.24 DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-157-162

Гистерезис теплообмена при кипении бинарных смесей жидкостей [*]

В. В. Кожокару[1], Е. В. Лыков[2], Е.С. Желонкина[3]**
[1]Южный проектный институт, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

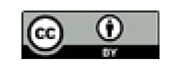
Heat transfer hysteresis under liquid binary mixtures boiling[***]

V. V. Kozhokaru[1], E. V. Lykov[2], E. S. Zhelonkina[3]**
[1]Southern Project Institute, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена изучению динамики нагрева при кипении бинарных смесей в большом объеме. Цель данной работы — экспериментально исследовать гистерезис по тепловому потоку при кипении бинарных смесей жидкости.
Материалы и методы. Эксперименты проводились на цилиндрическом нагревателе, который служил термометром сопротивления и датчиком выделяемой мощности. Нагрев производился квазистационарным методом. Объектом исследования были бинарные водные смеси жидкостей.
Результаты исследования. Результатом экспериментов стало получение кривых кипения при насыщенном и ненасыщенном кипении. На полученных кривых нагрева и охлаждения наблюдаются несколько характерных областей. Первая, где в жидкости теплообмен осуществлялся при помощи конвекции, и вторая — область пузырькового кипения, где обнаруживается гистерезис по тепловому потоку. Вскипание жидкости сопровождалось возникновением шума и «скачком» средней температуры поверхности нагрева. На кривой $\alpha(T_{cm})$ выявлен гистерезис теплоотдачи. Кривая нагрева проходит всегда ниже, чем кривая охлаждения. То есть при заданной температуре нагревателя коэффициент теплоотдачи всегда будет больше при охлаждении, чем при нагреве. Этот факт был обнаружен как при однократном, так и при многократных нагревах и охлаждениях. Кривая кипения — это две синхронно полученные в одном эксперименте зависимости $q(T_{cm})$ и $\alpha(T_{cm})$. На кривой кипения обнаружен гистерезис коэффициента теплоотдачи при нагреве и охлаждении нагревателя.
Обсуждение и заключения. Наряду с гистерезисом по тепловому потоку кипящих смесей впервые обнаружен гистерезис коэффициента теплоотдачи. Причиной гистерезиса по тепловому потоку являются разные значения теплоотдачи на кривой нагрева и кривой охлаждения при любой заданной T_{cm}. Динамика нагрева показывает, что

Introduction. Heating dynamics under binary mixtures pool boiling is considered. The work objective is to experimentally investigate the hysteresis on heat flux under the liquid binary mixtures boiling.
Materials and Methods. The experiments were conducted on a cylindrical heater which served as a resistance thermometer and a generated power. The heating was carried out by a quasi-steady-state method. Binary liquid mixtures were the target of the research.
Research Results. The experiments result in obtaining boiling curves under the saturated and unsaturated boiling. On the generated heating and cooling curves, several specific areas are observed. The first is the area where heat exchange is carried out in a liquid through convection, and the second is the bubble boiling region where the hysteresis is detected by the heat flux. The liquid flashing is followed by the noise generation and a jump in the mean temperature of the heating surface. The hysteresis of heat transfer is found out on the curve α (T_{cm}). The heating curve always passes below the cooling curve. That is, for the given heater temperature, the heat-transfer factor will always be greater under cooling than under heating. This fact is observed both under single and multiple heating and cooling. The boiling curve is two dependences q (T_{cm}) and α (T_{cm}) synchronously obtained in one experiment. The hysteresis of the heat-transfer coefficient is detected on the boiling curve under heating and cooling of the heater.
Discussion and Conclusions. Along with the hysteresis on the heat flux of the boiling mixtures, the hysteresis of the heat-transfer coefficient is first detected. The cause of hysteresis on the heat flux is various heat-transfer values on the heating and cooling curves at any specified Tст. The heating dynamics

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: kogokary@rambler.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.



кривая нагрева, как для тепловых потоков, так и для коэффициента теплоотдачи, проходит всегда при более низких значениях этих величин (q и α), чем кривая охлаждения.

shows that the heating curve, both for heat fluxes and for the heat-transfer factor, always passes at lower values of these quantities (q и α) than the cooling curve.

Ключевые слова: кипение бинарных смесей, кривая кипения, гистерезис по тепловому потоку, гистерезис по коэффициенту теплоотдачи.

Keywords: binary mixtures boiling, boiling curve, hysteresis on heat flux, hysteresis on heat-transfer coefficient.

Образец для цитирования: Кожокару, В. В. Гистерезис теплообмена при кипении бинарных смесей жидкостей / В. В. Кожокару, Е. В. Лыков, Е. С. Желонкина // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т.18, №2. — С. 157–162. DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-157-162

For citation: V. V. Kozhokaru, E. V. Lykov, E. S. Zhelonkina. Heat transfer hysteresis under liquid binary mixtures boiling. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.2, pp. 157–162.
DOI 10.23947/1992-5980-2018-18-2-157-162

Введение. Открытие пиковых тепловых потоков [1] и максимумов акустического давления [2] в бинарных системах привлекает внимание многих ученых [3–5]. Данная статья является решением актуальной задачи, т.к. посвящена исследованию динамики нагрева при кипении бинарных смесей жидкостей.

При кипении имеют место акустический гистерезис и гистерезис по тепловому потоку. Авторы работы [6] впервые обратили внимание на акустический гистерезис при кипении. При изучении кипения недогретой воды авторы заметили, что при нагреве и охлаждении уровень шума имеет разные значения.

Гистерезис по тепловому потоку удобно рассматривать на графике зависимости плотности теплового потока q от температуры нагревателя $T_{ст}$. Полученную при увеличении температуры нагревателя часть кривой $q(T_{ст})$ называют кривой нагрева, а при уменьшении $T_{ст}$ — кривой охлаждения. В работе [7] показано, что при насыщенном кипении воды кривая нагрева проходит по другой траектории, чем кривая охлаждения. Этот экспериментальный факт авторы связывают с переходными процессами при кипении.

Цель данной работы — экспериментально исследовать гистерезис по тепловому потоку при кипении бинарных смесей жидкости и найти возможные закономерности.

Экспериментальная установка. Подвод тепла в жидкость осуществлялся от медной проволоки-нагревателя диаметром 100 мкм, длиной 49,5 мм. Нагреватель, через который пропускали постоянный электрический ток, погружался в жидкость на 1 см от поверхности жидкости и служил термометром сопротивления и датчиком выделяемой мощности. Средняя температура поверхности проволоки $T_{ст}$ определялась по ранее полученной градуировочной кривой зависимости температуры проволоки от сопротивления проволоки. Ток I и падение напряжения на проволоке U измерялось с помощью цифровых мультиметров и токовых клешей фирмы APPA. Данные сохранялись на ЭВМ с частотой 0,5 с.

Исследование проводились в бинарных смесях из системы вода-этанол и вода-1-бутанол. Температура ядра жидкости $T_я$ фиксировалась с помощью ртутного термометра ТЛ-2. Для её поддержания использовался прецизионный термостат с внешним подогревателем.

Был применен квазистатический метод нагрева, т. е. по мере монотонного увеличения температуры нагревателя $T_{ст}$ температура пристеночного слоя, плотность теплового потока q и количество центров парообразования медленно возрастали. Регулятор тока давал возможность плавного увеличения $T_{ст}$.

Общая и принципиальная схемы экспериментальной установки приведены в предыдущих работах авторов [8, 9].

Результаты экспериментов гистерезиса по тепловому потоку. На рис. 1, 2 приведены результаты экспериментов по гистерезису теплового потока. Были проведены опыты нескольких видов: первый, когда нагрев и охлаждение нагревателя происходили однократно (рис. 1), и второй, когда нагрев и охлаждение нагревателя происходили многократно (рис. 2).

На полученных кривых нагрева и охлаждения наблюдаются несколько характерных областей. Первая, где в теплообмен жидкости осуществлялся при помощи конвекции. Так, при нагреве смеси вода-этанол (10% по массе этанола) конвекция при 60°С протекала от начала эксперимента до возникновения кипения при $T_{ст}$= 126°С. При нагреве смеси вода-этанол (96% по массе этанола) конвекция наблюдалась на участке температур от 79°С до 98°С.

При незначительном увеличении электрической мощности на нагревателе возникало кипение. Вскипание жидкости сопровождалось возникновением шума и «скачком» средней температуры поверхности нагрева. На нагревателе наблюдалось несколько активных центров парообразования, на которых росли и отрывались паровые пузырьки.

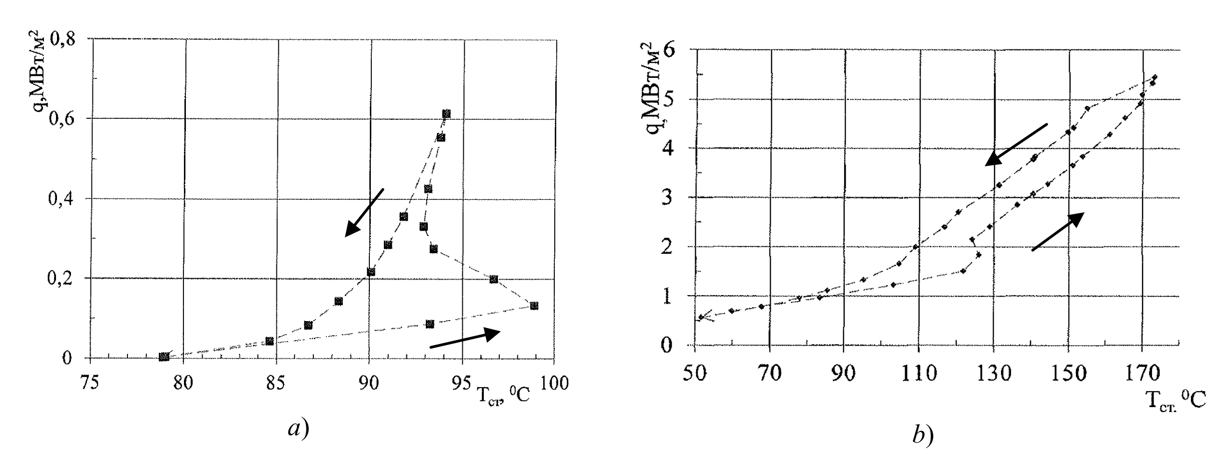


Рис. 1. Гистерезис по тепловому потоку в области пузырькового кипения: a — в смеси вода-этанол (96% по массе этанола) — насыщенное кипение; b — в смеси вода-этанол (10% по массе этанола) при $T_я$= 20°C

Fig. 1. Hysteresis on heat flux in bubble boiling region: a - in water-ethanol mixture (96% by ethanol mass) – saturated boiling, b - in water-ethanol mixture (10% by ethanol mass) at $T_я$ = 20°C.

Важно отметить, что кипение возникало при температурах больших, чем температура кипения исследуемых жидкостей. Этот факт хорошо согласуется с исследованиями, проводившимися в дистиллированной воде. По данным [10], при исследовании ненасыщенного кипения ($T_я$=20°C) перегрев жидкости $\Delta T = (T_{ст} - T_s)$ составил 40–50°C. По данным работы [7] при кипении воды ($T_я$=20–30°C) перегрев составил порядка 30–40°C. При экспериментах в смеси вода-этанол, содержащих 10% по массе этанола, при схожих условиях ($T_я$=20°C, диаметр нагревателя — 100мкм) перегрев составил 40°C. При насыщенном кипении смеси вода-этанол 96% перегрев жидкости составил 20°C.

При дальнейшем нагреве происходит развитие пузырькового кипения. При этом подсчет показывает, что увеличивается количество активных центров парообразования и частота отрыва паровых пузырьков, а также растет плотность теплового потока.

Пузырьковое кипение — вторая область на кривой нагрева. На этом участке с ростом $T_{ст}$ плотность теплового потока q возрастает до прекращения нагрева. В смеси вода-этанол при 10% по массе этанола нагрев остановили при $T_{ст}$=172°C и плотности теплового потока 5,4 МВт/м². Величина q примерно равна $0{,}4q_{кр}$ в данной смеси. В смеси вода-этанол при 96% по массе этанола нагрев прекратился при значениях плотности теплового потока близких к критической плотности теплового потока ($T_{ст}$= 94 °C, q = 0,61 МВт/м²).

После нагрева начинался процесс охлаждения. При уменьшении $T_{ст}$ кипение затухало и переходило в конвекцию. Обратного «скачка» температуры поверхности нагрева от кипения к конвекции не обнаружено. В смеси вода-этанол при 10% по массе этанола кипение прекратилось при $T_{ст}$= 95°C и q = 1,3 МВт/м². В смеси вода-этанола при 96% по массе этанола кипение не наблюдалось при $T_{ст}$= 84 °C и q=0,04 МВт/м².

На рис. 2 приведены результаты измерения, при котором три раза последовательно получены кривые кипения и охлаждения. Во всех трех случаях кривая нагрева проходит ниже кривой охлаждения. Каждая реализация нагрева и охлаждения в области пузырькового кипения не совпадает друг с другом.

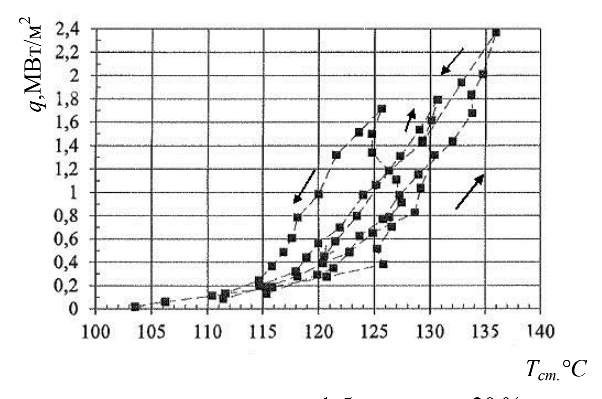
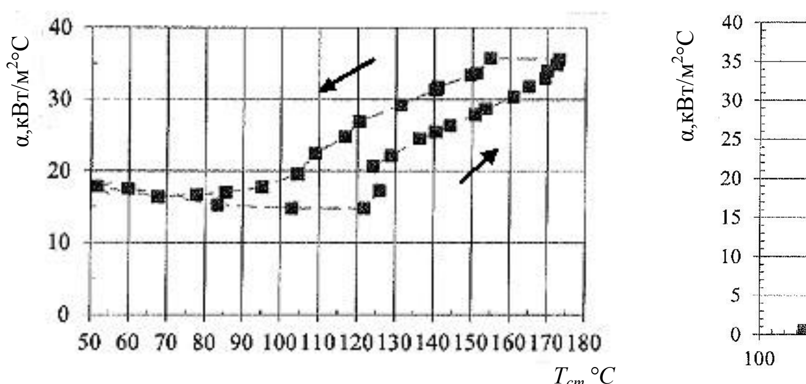


Рис. 2. Гистерезис по тепловому потоку в смеси вода-1-бутанол при 20 % по массе 1-бутанола ($T_я$= 90°C) в области пузырькового кипения

Fig. 2. Hysteresis on heat flux in water-1-butanol mixture at 20 % by butanol mass ($T_я$ = 90 °C) in bubble boiling region

Гистерезис теплоотдачи при кипении жидкостей. Для экспериментов в смеси вода-этанол при 10% по массе этанола и вода-1-бутанол 20% по массе 1-бутанола на рис. 3 приведены зависимости α($T_{ст}$). Для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении мы использовали выражение:

$$\alpha = q/(T_{ст} - T_я)$$



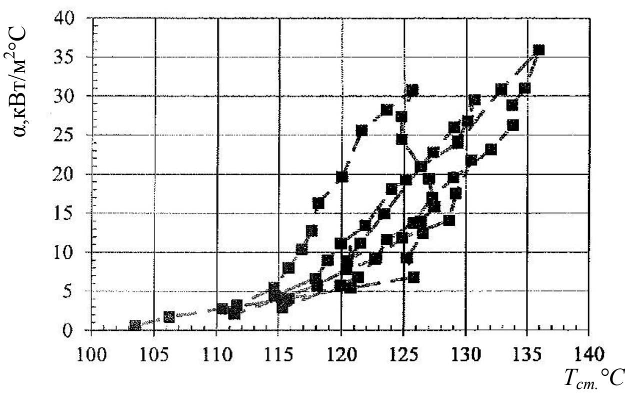


Рис. 3. Гистерезис теплоотдачи в области пузырькового кипения (a — в смеси вода-этанол 10 % по массе этанола ($T_я$=20 °С), b — в смеси вода-1-бутанол 20 % по массе бутанола ($T_я$=90 °С)

Fig. 3. Heat-transfer hysteresis in bubble boiling region (a — in water-ethanol mixture at 10 % by ethanol mass ($T_я$=20 °C), b — in water-1-butanol mixture at 20 % by butanol mass ($T_я$ = 90 °C)

На кривой α($T_{ст}$) обнаруживается гистерезис теплоотдачи. Кривая нагрева проходит всегда ниже, чем кривая охлаждения. Т. е. при заданной температуре нагревателя коэффициент теплоотдачи всегда будет больше при охлаждении, чем при нагреве. Этот факт был замечен как при однократном нагреве и охлаждении, так и при многократных нагревах и охлаждениях.

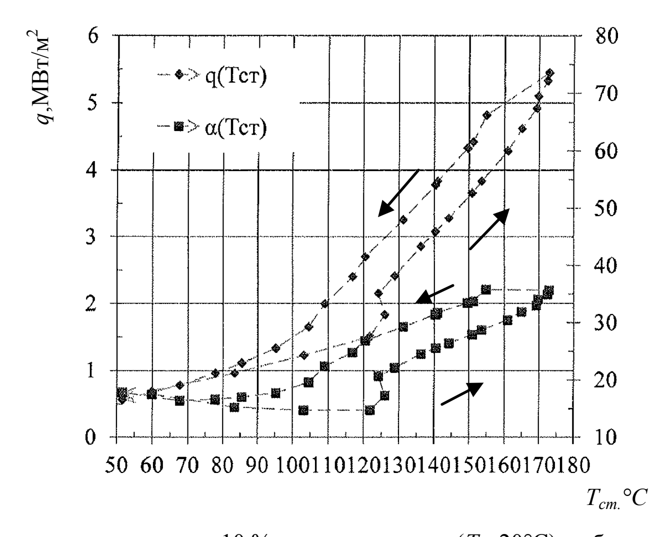


Рис. 4. Кривая кипения в смеси вода-этанол 10 % по массе этанола ($T_я$=20°С) в области пузырькового кипения

Fig. 4. Boiling curve in water-ethanol mixture at 10 % ($T_я$ = 20 °C) in nucleate boiling region

Кривая кипения. Представим гистерезис по тепловому потоку на кривой кипения. Кривая кипения — это две синхронно полученные в одном эксперименте зависимости $q(T_{ст})$ и α($T_{ст}$). Такая диаграмма показана на рис. 4.

Разделим кривую кипения на 2 участка. На первом участке в области 50°С <$T_{ст}$ < 85°С гистерезис по тепловому потоку не обнаруживается. Если установить любую $T_{ст}$ на данном участке, то величины коэффициентов теплоотдачи при нагреве и охлаждении будут иметь близкие значения. На втором участке 85°С <$T_{ст}$< 172°С наблюдается гистерезис по типовому потоку. Причиной гистерезиса по тепловому потоку является разные значения теплоотдачи на кривой нагрева и кривой охлаждения при любой заданной $T_{ст}$.

Выводы.

- Наряду с гистерезисом по тепловому потоку кипящих смесей, впервые обнаружен гистерезис коэффициента теплоотдачи.

- Изученная динамика нагрева при пузырьковом кипении бинарных смесей показывает, что кривая нагрева, как для тепловых потоков, так и для коэффициента теплоотдачи, проходит всегда при более низких значениях этих величин (q и α), чем кривая охлаждения.

Библиографический список

1. Van Wijk, W.R. Heat transfer to boiling liquid mixtures/ W.R. Van Wijk, A. S. Vos, S.J.D. van Stralen// Chem. Eng. Sci, — 1956. — Vol. 5 — P. 68- 80.
2. Lykov, E.V. Thermoacoustick effects in surface boiling liquids/ E.V. Lykov// Int. J. Heat Mass Transfer. — 1972. — Vol. 15. — P. 1603-1614.
3. Романов, В. В. Связь между скоростью испарения и критической плотностью теплового потока кипящих бинарных смесей жидкостей/ В. В. Романов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — №4(65). — С. 56–60.
4. Reddy, R.P. The peak boiling heat flux in saturated ethanol-water mixtures/ R.P. Reddy, J.H. Lienhard //ASME Journal of Heat Transfer - 1989. - Vol. 111. - P, 480 - 486.
5. Ковалев, С. А. Кризис кипения. Две конкурирующие идеи // С. А. Ковалев, С. В. Усатиков / Труды шестой Российской национальной конференции по теплообмену. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2014. — С. 566–569.
6. Osborne, M.F.M. The acoustical concomitants of cavitation and boiling produced by a hot wire/ M. F. M. Osborne, F.M. Holland// J. Acoust. Soc. Am. — 1954. —Vol. 19(1). —P. 13-29.
7. Лыков, Е. В. Переходные процессы и теплоакустические эффекты при поверхностном кипении жидкости / Е. В. Лыков, А. Г. Синецкая // Инженерно-физический журнал. — 2005. — Т. 78, № 4, — С. 22–26.
8. Кожокару, В. В. Кризис теплоотдачи и критический тепловой поток при нагреве кипящих жидкостей / В. В. Кожокару, Е. В. Лыков // Авиакосмические технологии (АКТ-2015): Труды XVI Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. — Воронеж, 2015. —С.148–153.
9. Кожокару, В. В. Исследование критической плотности теплового потока при квазистационарном нагреве поверхностно кипящих бинарных смесей / В. В. Кожокару, В. В. Лыков// Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — №1(80). — С.48–53.
10. Афанасьев, С. Ю. Исследование теплообмена при недогретом пузырьковом кипении в условиях стабилизации температуры проволочного нагревателя / С. Ю. Афанасьев, С. А. Жуков, С. Б. Ечмаев // Теплофизика высоких температур. — 1996. — Т. 34, №4. —С. 583–589.

References

1. Van Wijk, W.R., Vos, A.S., van Stralen, S.J.D. Heat transfer to boiling liquid mixtures. Chem. Eng. Sci, 1956, vol. 5, pp. 68- 80.
2. Lykov, E.V. Thermoacoustick effects in surface boiling liquids. Int. J. Heat Mass Transfer,1972, vol. 15, pp. 1603-1614.
3. Romanov, V.V. Svyaz' mezhdu skorost'yu ispareniya i kriticheskoy plotnost'yu teplovogo potoka kipyashchikh binarnykh smesey zhidkostey. [Interconnection between evaporation rate and critical density of heat flow of boiling binary liquid mixtures.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 4(65), pp. 56–60 (in Russian).
4. Reddy, R.P., Lienhard , J.H. The peak boiling heat flux in saturated ethanol-water mixtures. ASME Journal of Heat Transfer, 1989, vol. 111, pp. 480 - 486.
5. Kovalev, S.A., Usatikov, S.V. Krizis kipeniya. Dve konkuriruyushchie idei. [Boiling crisis. Two competing ideas.] Trudy shestoy Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu. [Proc. Sixth Russian National Conf. on Heat Transfer.] Moscow: MAI Publ. House, 2014, pp. 566–569 (in Russian).
6. Osborne, M.F.M., Holland, F.M. The acoustical concomitants of cavitation and boiling produced by a hot wire. J. Acoust. Soc. Am., 1954, vol. 19(1), pp. 13-29.
7. Lykov, E.V., Sinetskaya, A.G. Perekhodnye protsessy i teploakusticheskie effekty pri poverkhnostnom kipenii zhidkosti. [Transient processes and Thermoacoustic effects in surface boiling of a liquid.] Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2005, vol. 78, no. 4, pp. 22–26 (in Russian).

8. Kozhokaru, V.V., Lykov, E.V. Krizis teplootdachi i kriticheskiy teplovoy potok pri nagreve kipyashchikh zhidkostey. [Heat transfer crisis and critical heat flux under heating of boiling liquids.] Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2015): Trudy XVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. [Aerospace Technologies (ACT-2015): Proc. XVI All-Russian Sci.-Tech. Conf. and School of Young Scientists, Post-Graduate Students and Students.] Voronezh, 2015, pp.148–153 (in Russian).

9. Kozhokaru, V.V., Lykov, E.V. Issledovanie kriticheskoy plotnosti teplovogo potoka pri kvazistatsionarnom nagreve poverkhnostno kipyashchikh binarnykh smesey. [Study on critical heat flux density at the quasi-stationary heating of superficially boiling binary mixtures.] Vestnik of DSTU, 2015, no. 1(80), pp. 48–53 (in Russian).

10. Afanasyev, S.Y., Zhukov, S.A., Yechmaev, S.B. Issledovanie teploobmena pri nedogretom pu¬zyr'kovom kipenii v usloviyakh stabilizatsii temperatury provolochnogo nagrevatelya. [Study on heat transfer in case of subcooled nucleate boiling under conditions of temperature stabilization of wire heater.] High Temperature, 1996, vol. 34, no. 4, pp. 583–589 (in Russian).

Поступила в редакцию 17.12.2017
Сдана в редакцию 18.12.2017
Запланирована в номер 15.03.2018

Received 17.03.2017
Submitted 18.12.2017
Scheduled in the issue 15.03.2018

Об авторах:

Кожокару Виктор Владимирович,
главный инженер проекта Южного проектного института (РФ,344082, г. Ростов-на-Дону, ул. М. Горького 11/43),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7220-4107
kogokary@rambler.ru

Лыков Евгений Васильевич,
профессор кафедры «Теплоэнергетика и прикладная гидромеханика» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), доктор физико-математических наук, профессор
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7812-8624
elykov@mail.ru

Желонкина Елена Сергеевна,
аспирантка кафедры «Теплоэнергетика и прикладная гидромеханика» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2931-1385
elena-simonenko@indox.ru

Authors:

Kozhokaru, Victor V.,
chief project engineer, South Project Institute (RF, 344082, Rostov-on-Don, M. Gorky St., 11/43),
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7220-4107
kogokary@rambler.ru

Lykov, Evgeny V.,
professor of the Heat Power Engineering and Applied Hydromechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7812-8624
elykov@mail.ru

Zhelonkina, Elena S.,
postgraduate of the Heat Power Engineering and Applied Hydromechanics Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2931-1385
elena-simonenko@indox.ru